

# Физико-топологическое моделирование фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации на основе материалов типа $A^{III}B^V$ с учетом зависимостей подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля

И.В. Писаренко, Е.А. Рындин

Южный федеральный университет, ivan123tgn@yandex.ru

**Аннотация** — Данная работа посвящена проблеме исследования и разработки быстродействующих полупроводниковых фотодетекторов, предназначенных для функционирования в составе интегральных систем оптической коммутации совместно с лазерами-модуляторами на основе наногетероструктур типа  $A^{III}B^V$ . Предложены нестационарные численные физико-топологические модели, методы моделирования и прикладные программные средства, которые позволяют исследовать процессы переноса и накопления носителей заряда, протекающие в структурах базовых типов интегральных полупроводниковых фотоприемников. Для повышения адекватности результатов моделирования в предлагаемых моделях учитываются зависимости подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля, обусловленные междолинным переходом электронов и насыщением дрейфовых скоростей носителей заряда в GaAs. На основе полученных результатов сделаны выводы о существенном влиянии указанных физических эффектов на быстродействие интегральных фотодетекторов на основе материалов типа  $A^{III}B^V$  и необходимости их учета при моделировании подобных приборов.

**Ключевые слова** — интегральные системы оптической коммутации, быстродействующие интегральные фотодетекторы, численное физико-топологическое моделирование, диффузионно-дрейфовая система уравнений, моделирование зависимостей подвижностей носителей заряда в GaAs от напряженности электрического поля.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема улучшения характеристик межэлементных соединений в интегральных схемах (ИС) является одной из ключевых проблем современных микро- и нанoeлектроники. Традиционные металлические соединения, широко используемые для коммутации интегральных элементов с момента возникновения микроэлектроники, постепенно перестают удовлетворять растущим требованиям разработчиков к таким характеристикам, как пропускная способность, энергоэффективность, помехозащищенность, надежность и технологичность. В современных условиях данная проблема является актуальной для разработчиков многоядерных цифровых ультрабольших интегральных схем (УБИС). Увеличение степени интеграции микро-

схем и площадей кристаллов в совокупности с уменьшением проектных норм и тенденцией наращивания числа ядер в многоядерных системах приводит к усложнению системы интегральных межсоединений, росту длин межъядерных коммутационных линий и плотности размещения соединений на кристалле, что негативно отражается на характеристиках УБИС.

В настоящее время исследуются различные методы, позволяющие решить рассматриваемую проблему. Одним из перспективных подходов является оптическая коммутация элементов ИС. Многочисленные преимущества оптоэлектронного подхода подробно описаны в работе [1]. На современном этапе развития науки и техники реализация оптоэлектронного подхода как массовой технологии предусматривает создание интегрально-оптических схем, в которых сохраняется традиционная электронная элементная база. Конструктивно и технологически интегрированные системы оптической коммутации используются для замены металлических проводников с критическими параметрами (например, межъядерных соединений в УБИС) и в общем случае включают в себя следующие основные функциональные узлы: источники излучения (полупроводниковые лазеры), модуляторы, интегральные волноводы и фотодетекторы.

В данной работе рассматривается предложенный в [2] перспективный подход, предусматривающий создание многоядерных интегрально-оптических схем с кремниевыми цифровыми ядрами и интегральными системами межъядерной оптической коммутации на основе материалов типа  $A^{III}B^V$ . В качестве базовых элементов подобных систем предлагается использовать быстродействующие интегральные инжекционные лазеры с двойными  $A^{III}B^V$ -наногетероструктурами и функционально интегрированными модуляторами излучения [3-5]. Согласно результатам моделирования, частота амплитудной модуляции лазерных импульсов в подобных приборах может достигать 1 ТГц и выше.

Данная статья посвящена актуальной проблеме исследования и разработки интегральных фотоприемников, предназначенных для детектирования субпикосекундных лазерных импульсов, генерируемых описанными выше структурами лазеров-модуляторов. В каче-

стве основного инструмента для проведения исследований предлагается использовать методику физико-топологического численного моделирования. В работе рассматриваются базовые типы интегральных полупроводниковых фотодетекторов – p-i-n-структуры и фотодиоды с барьерами Шоттки. В качестве материала для основных областей фоточувствительных приборов выбран GaAs.

Целями работы являются исследование переходных процессов, протекающих в структурах базовых типов интегральных фотодетекторов, с использованием физико-топологических моделей и оценка влияния процессов междолинного перехода электронов и насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда в GaAs на быстродействие фоточувствительных приборов. В данной статье рассматривается детектирование субпикосекундных лазерных импульсов, характерных для рассмотренных выше перспективных интегральных систем оптической коммутации.

## II. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Процессы переноса и накопления носителей заряда в структурах фотоприемников интегральных систем оптической коммутации описывались с использованием нестационарных физико-топологических моделей на основе диффузионно-дрейфовой системы уравнений полупроводника [6]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \nabla[\mu_n(-n\nabla\varphi + \varphi_T\nabla n)] + R; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \nabla[\mu_p(p\nabla\varphi + \varphi_T\nabla p)] + R; \quad (2)$$

$$\nabla(\varepsilon \cdot \nabla\varphi) = \frac{q}{\varepsilon_0}(n - p - N), \quad (3)$$

где  $n$ ,  $p$  – концентрации электронов и дырок;  $\mu_n$ ,  $\mu_p$  – подвижности электронов и дырок;  $t$  – время;  $q$  – элементарный заряд;  $\varphi$  – электростатический потенциал;  $\varphi_T$  – температурный потенциал;  $R$  – изменение числа электронов и дырок в единице объема в единицу времени за счет разности скоростей генерации и рекомбинации;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $N$  – эффективная концентрация легирующих примесей.

В данной работе рассматривалась схема включения фотодетекторов с выходом по току, которой соответствуют следующие граничные условия для системы уравнений (1)–(3) [6]:

1) на омических контактах:

$$n = \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}; \quad (4)$$

$$p = -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2}; \quad (5)$$

$$\varphi = \varphi_T \ln \frac{n}{n_i} + U(t) = -\varphi_T \ln \frac{p}{n_i} + U(t); \quad (6)$$

2) на контактах Шоттки:

$$n = \left( \frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \right) \cdot e^{-\frac{\varphi_K}{\varphi_T}}; \quad (7)$$

$$p = \left( -\frac{N}{2} + \sqrt{\left(\frac{N}{2}\right)^2 + n_i^2} \right) \cdot e^{\frac{\varphi_K}{\varphi_T}}; \quad (8)$$

$$\varphi = \varphi_T \ln \frac{n}{n_i} + U(t) - \varphi_K = -\varphi_T \ln \frac{p}{n_i} + U(t) - \varphi_K, \quad (9)$$

где  $n_i$  – собственная концентрация носителей заряда;  $U(t)$  – напряжение, прикладываемое к контакту в момент времени  $t$ ;  $\varphi_K$  – высота потенциального барьера Шоттки.

Для описания процессов генерации и рекомбинации носителей заряда в структурах фотодетекторов использовались следующие аналитические модели:

1) модель рекомбинации через ловушки Шокли-Рида-Холла (использовалась в областях с примесной проводимостью) [7]:

$$R_{S-R-H} = \frac{np - n_i^2}{\tau_p(n + n_i) + \tau_n(p + p_1)}; \quad (10)$$

$$n_1 = N_c \exp\left(\frac{-E_c + E_T}{kT}\right); \quad (11)$$

$$p_1 = N_v \exp\left(\frac{-E_v + E_T}{kT}\right); \quad (12)$$

где  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  – времена жизни электронов и дырок;  $N_c$ ,  $N_v$  – эффективные плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне;  $E_c$ ,  $E_v$  – энергетические уровни дна зоны проводимости и потолка валентной зоны;  $E_T$  – энергетический уровень ловушек;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура полупроводника;

2) модель межзонной излучательной рекомбинации (использовалась в областях с собственной проводимостью) [7]:

$$R_{dir} = C \cdot (np - n_i^2), \quad (13)$$

где  $C$  – коэффициент межзонной излучательной рекомбинации, определяемый по формуле Гарбузова [8]:

$$C = 3 \cdot 10^{-10} \cdot \left(\frac{300\text{K}}{T}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{E_g}{1.5\text{эВ}}\right)^2 \frac{\text{см}^3}{\text{с}}, \quad (14)$$

где  $E_g$  – ширина запрещенной зоны полупроводника;

3) модель межзонной ударной Оже-рекомбинации [7]:

$$R_A = (np - n_i^2)(\alpha_n n + \alpha_p p), \quad (15)$$

где  $\alpha_n$ ,  $\alpha_p$  – коэффициенты Оже для электронов и дырок;

4) модель биполярной оптической генерации носителей заряда [9]:

$$R_{opt} = \frac{QP}{E_{ph}}, \quad (16)$$

где  $Q$  – коэффициент поглощения фотонов в резонаторе фотодетектора;  $P$  – объемная плотность мощности лазерного излучения;  $E_{ph}$  – энергия фотонов падающего излучения.

Коэффициент  $Q$ , входящий в формулу (16), позволяет учесть влияние параметров оптического резонатора и особенностей процесса поглощения фотонов материалом активной области на характеристики фотоприемника. В данной работе для оценки  $Q$  использовалась формула пиковой квантовой эффективности фотодетектора с резонатором, представленная в работе [10]. Для рассматриваемых конструкций фотодетекторов  $Q = 0,4$ .

Для описания зависимостей подвижностей носителей заряда от температуры и концентрации примесей использовалась аналитическая модель для малых полей, предложенная в [11]:

$$\mu_c(N, T) = \mu_{max,c}(T_0) \cdot \frac{B_c(N) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\beta_c}}{1 + B_c(N) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\alpha_c + \beta_c}}; \quad (17)$$

$$B_c(N) = \left[ \frac{\mu_{min,c} + \mu_{max,c} \cdot \left(\frac{N_{g,c}}{N}\right)^{\gamma_c}}{\mu_{max,c} - \mu_{min,c}} \right]_{T=T_0}, \quad (18)$$

где  $c$  – тип проводимости полупроводника ( $n$  – электронный или  $p$  – дырочный);  $T_0 = 300$  К;  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\gamma_c$ ,  $\mu_{min,c}$ ,  $\mu_{max,c}$ ,  $N_{g,c}$  – параметры, зависящие от типа полупроводникового материала.

В данной работе учитывалось влияние напряженности электрического поля в структурах фоточувствительных приборов на подвижность электронов, обусловленное их междолинным переходом. Средняя дрейфовая скорость электронов  $v_n$  рассчитывалась с использованием упрощенной модели, описывающей переходы между двумя долинами ( $\Gamma$  и  $L$  в GaAs) на основе предположения о равенстве электронных температур [12]:

$$T_e = T + \frac{2q\tau_e\mu_{low,n}}{3k} E^2 \left[ 1 + r \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT_e}\right) \right]^{-1}; \quad (19)$$

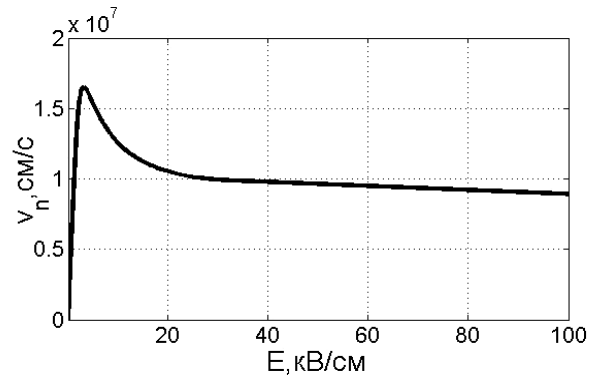
$$v_n = \mu_{low,n} E \left[ 1 + r \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT_e}\right) \right]^{-1}, \quad (20)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля;  $T_e$  – электронная температура;  $\tau_e$  – время релаксации энергии;  $\mu_{low,n}$  – подвижность электронов в  $\Gamma$ -долине, рассчитываемая по формулам (17)–(18);  $E$  – напряженность электрического поля;  $\Delta E$  – энергетический зазор между минимумами зоны проводимости;  $r$  – отношение плотностей состояний в верхней и нижней долинах, которое рассчитывалось по следующей формуле [12]:

$$r = \frac{M_2}{M_1} \left( \frac{m_2^*}{m_1^*} \right)^{3/2}, \quad (21)$$

где  $M_1$ ,  $M_2$  – число верхних и нижних долин;  $m_1^*$ ,  $m_2^*$  – эффективные массы электронов в соответствующих долинах; для GaAs  $M_1 = 1$ ,  $M_2 = 4$ ,  $m_1^* = 0,067m_e$ ,  $m_2^* = 0,55m_e$  ( $m_e$  – масса электрона), следовательно,  $r = 94$ .

Модель (19)–(21) позволяет получать адекватные результаты только для относительно слабых полей. При значениях напряженности поля более 30 кВ/см, соответствующих насыщению дрейфовой скорости электронов, целесообразно использовать линейную аппроксимацию экспериментальных данных, полученных другими авторами и представленных в [13]. Пример результирующей зависимости  $v_n(E)$ , рассчитанной для  $i$ -области  $p$ - $i$ - $n$ -фотодиода, представлен на рис. 1. Указанные результаты качественно соответствуют экспериментальным данным и результатам расчета методом Монте-Карло, приведенным в [14].



**Рис. 1.** Зависимость дрейфовой скорости электронов в  $i$ -GaAs от напряженности электрического поля при  $T = 300$  К, рассчитанная с использованием модели (19) – (21) и экспериментальных данных, полученных другими авторами [13]

Расчет подвижности дырок осуществлялся с учетом эффекта насыщения дрейфовой скорости носителей заряда данного типа. Использовалась аналитическая модель для GaAs, предложенная в работе [9] на основе анализа результатов моделирования методом Монте-Карло:

$$v_p = \frac{\mu_{low,p} \cdot E}{\left(1 + \left(\frac{\mu_{low,p} \cdot E}{v_{sat,p}}\right)^\beta\right)^{\frac{1}{\beta}}}, \quad (22)$$

где  $v_p$  – средняя дрейфовая скорость дырок;  $\mu_{low,p}$  – подвижность дырок в слабом электрическом поле, определяемая по формулам (17)–(18);  $v_{sat,p}$  – скорость насыщения дрейфа дырок;  $\beta = 5$ .

Вычисление величины  $v_{sat,p}$  осуществлялось на основе представленной ниже формулы, полученной нами из соображения соответствия скоростей насыщения дрейфа электронов и дырок энергии  $E_{оф}$ , необходимой для возбуждения оптического фона:

$$E_{оф} \approx \frac{m_n^* v_{sat,n}^2}{2} \approx \frac{m_p^* v_{sat,p}^2}{2} \Rightarrow \frac{v_{sat,n}}{v_{sat,p}} \approx \sqrt{\frac{m_p^*}{m_n^*}}, \quad (23)$$

где  $m_n^*$ ,  $m_p^*$  – эффективные массы электронов и дырок.

Зависимость  $v_p(E)$  в i-GaAs, рассчитанная с использованием формул (21)–(23), представлена на рис. 2.

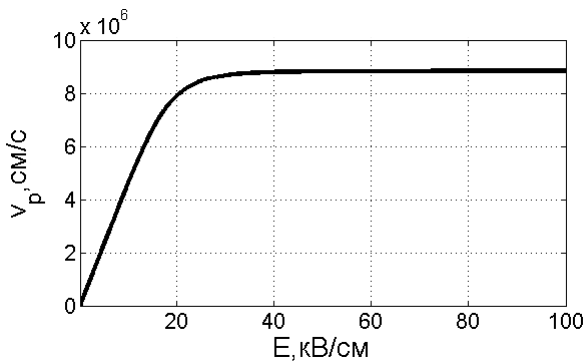


Рис. 2. Зависимость дрейфовой скорости дырок в i-GaAs от напряженности электрического поля, рассчитанная с использованием модели (22)–(23) при  $T = 300$  К

На рис. 3 приведены зависимости подвижностей электронов и дырок в i-GaAs от напряженности электрического поля, вычисленные с использованием описанных выше методик. Как следует из анализа графиков, рост напряженности поля в структурах приборов приводит к существенному уменьшению подвижностей носителей заряда. Учитывая тот факт, что полупроводниковые диоды характеризуются значительными величинами напряженности встроенного электрического поля, можно сделать вывод, что эффекты междолинного перехода электронов и насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда в GaAs могут оказывать существенное влияние на быстродействие подобных приборов.

Следует отметить, что формулы (19)–(23) описывают стационарные состояния. Однако рост концентраций носителей заряда при освещении фотодетектора не приводит к заметным изменениям распределения напряженности электрического поля в его структуре,

поэтому при исследовании переходных процессов по освещению динамическим характером рассматриваемых эффектов можно пренебречь.

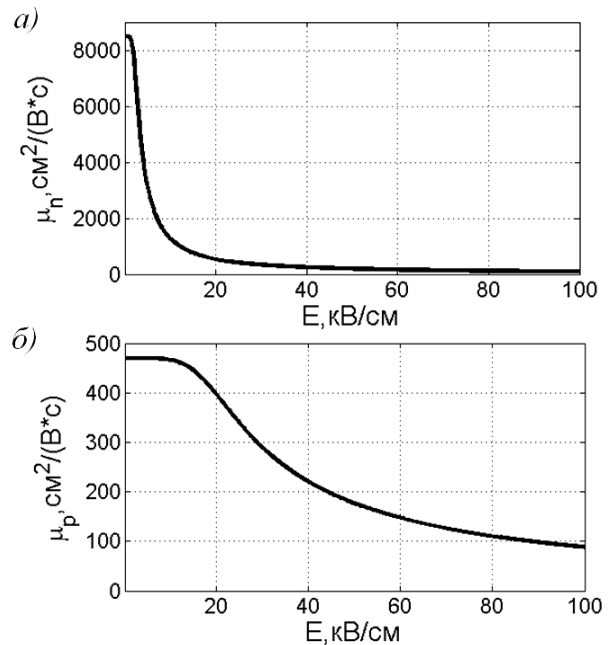


Рис. 3. Зависимости подвижностей электронов (а) и дырок (б) в i-GaAs от напряженности электрического поля при  $T = 300$  К, рассчитанные с использованием моделей (19)–(23)

Решение системы уравнений (1)–(3) с граничными условиями (4)–(9) и моделями для расчета параметров (10)–(23) возможно только с привлечением численных методов решения задач математической физики. В данной работе для дискретизации дифференциальных уравнений модели предлагается использовать численный метод конечных разностей [15].

При численном моделировании фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации возникает ряд проблем, обусловленных особенностями рассматриваемой задачи. К подобным проблемам следует отнести, прежде всего, проявление неустойчивости схем решения нестационарных уравнений и возникновение отрицательных концентраций из-за накопления погрешности округления чисел на разрядной сетке компьютера. Для достижения приемлемой адекватности результатов моделирования была разработана методика решения диффузионно-дрейфовой системы уравнений, имеющая следующие особенности:

- 1) для нормировки величин используются стандартные нормировочные коэффициенты, приведенные в работе [6];
- 2) для дискретизации производных по времени применяется явная разностная схема [15];
- 3) расчет начальных условий осуществляется путем решения системы уравнений (1)–(3) в стационарной форме итерационным методом Гуммеля [6];
- 4) используются различные базисы переменных: в уравнениях (1) и (2) левые части рассматриваются в

базисе  $\{n, p, \varphi\}$ , а правые – в базисе  $\{F_n, F_p, \varphi\}$ , где  $F_n$  и  $F_p$  – экспоненты квазиуровней Ферми, что позволяет упростить конечно-разностную схему;

5) при дискретизации правых частей уравнений (1) и (2) используется противоточная схема [16];

6) системы линейных алгебраических уравнений решаются прямым методом.

В данной работе, как отмечалось выше, рассматривается схема включения фотодетекторов с выходом по току. Данный факт обуславливает необходимость обеспечения приемлемой точности расчета плотности тока в структурах приборов с целью повышения адекватности результатов моделирования. Поэтому вместо традиционных выражений, которые включают диффузионную и дрейфовую составляющие, были использованы формулы, предложенные Слотбумом [6]:

$$\vec{j}_n = q\varphi_T\mu_n\nabla F_n \cdot \exp\left(\frac{\varphi}{\varphi_T}\right); \quad (24)$$

$$\vec{j}_p = q\varphi_T\mu_p\nabla F_p \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{\varphi_T}\right), \quad (25)$$

где  $\vec{j}_n$ ,  $\vec{j}_p$  – электронная и дырочная составляющие плотности тока. Погрешность расчета плотности тока определялась разностью ее значений на омических контактах, которая в проведенных расчетах соответствовала погрешности округления на разрядной сетке компьютера. Сравнение результатов моделирования, полученных с использованием выражений (24)–(25) и традиционных диффузионно-дрейфовых формул, позволило сделать вывод о целесообразности применения предлагаемого подхода.

Помимо электронной и дырочной составляющих при расчете полного тока в структурах фотодетекторов учитывался максвелловский ток смещения  $\vec{j}_d$ , который определяется следующим образом [9]:

$$\vec{j}_d = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (26)$$

где  $\vec{E}$  – вектор напряженности электрического поля.

Для реализации представленных выше моделей и методов численного физико-топологического моделирования фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации были разработаны специализированные пакеты прикладного программного обеспечения (ПО) на языке MATLAB в среде GNU Octave, позволяющие осуществлять моделирование GaAs p-i-n-структур и фотодиодов Шоттки с различными электрофизическими и конструктивно-технологическими параметрами.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Структуры исследованных в данной работе фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации представлены на рис. 4. Оптические резонаторы,

образованные полупрозрачными (2) и полностью отражающими (4) зеркалами, служат для повышения квантовой эффективности фотоприемников. Рассматриваются фотодиоды Шоттки с приконтактными областями n- и p-типов. Высоколегированные p<sup>+</sup>- и n<sup>+</sup>-области используются для формирования омических контактов к приборам.

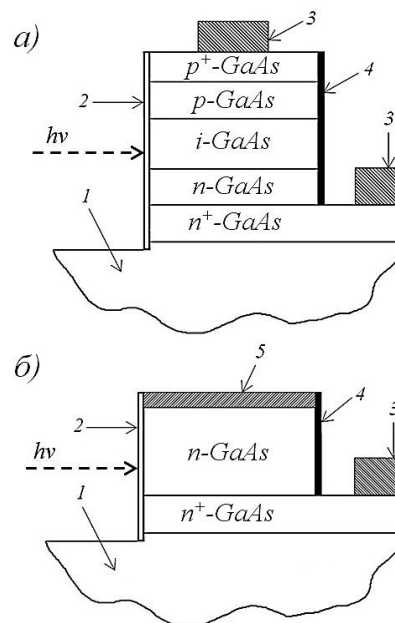


Рис. 4. Структуры исследованных интегральных фотодетекторов – GaAs p-i-n-фотодиода (а) и фотодиода Шоттки (б): 1 – полуизолирующий GaAs; 2 – полупрозражающие зеркала; 3 – омические контакты; 4 – полностью отражающие зеркала; 5 – слой металла, образующий контакт Шоттки

Моделирование осуществлялось для одномерной координатной сетки в предположении равномерного освещения структур фоточувствительных приборов оптическим излучением. Максимальная мощность падающего излучения составляла 1 мВт. Энергия фотонов принималась равной ширине запрещенной зоны GaAs. Физические процессы, протекающие при распространении лазерных импульсов через оптические волноводы интегральных систем коммутации, в данной работе не учитывались. При расчете начальных условий задавалось рабочее значение напряжения питания  $U = -0,5$  В.

Исследовался следующий режим работы фотоприемников интегральных систем оптической коммутации. В начальный момент времени фотодиод не освещался и находился в стационарном состоянии, соответствующем окончанию переходного процесса по питанию. В момент времени 0,1 пс одиночный прямоугольный лазерный импульс длительностью 0,1 пс освещал области фотодетектора. После окончания импульса расчет велся до момента времени 0,4 пс.

В ходе выполнения работы был проведен сравнительный анализ эффективности предлагаемой схемы численного решения диффузионно-дрейфовой системы уравнений и ее аналогов, основанных на использова-

нии неявной схемы, схемы Шарфеттера-Гуммеля и метода Кранка-Никольсона. Результаты анализа показали, что в рассматриваемой задаче предлагаемая методика позволяет обеспечить более высокую адекватность результатов моделирования, поскольку использование рассмотренных аналогичных схем в ряде случаев приводит к неадекватным результатам (в частности, к возникновению отрицательных концентраций носителей заряда).

На рис. 5 приведены графики, иллюстрирующие распределения концентраций носителей заряда в структурах фотоприемников до и после воздействия оптического излучения.

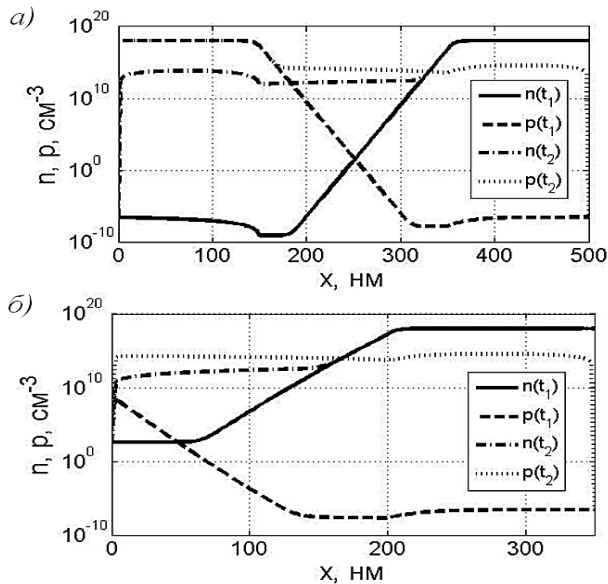


Рис. 5. Распределения концентраций электронов ( $n$ ) и дырок ( $p$ ) в структурах GaAs p-i-n фотодиода (а) и фотодиода Шоттки p-типа (б) в моменты времени, соответствующие переднему ( $t_1$ ) и заднему ( $t_2$ ) фронтам прямоугольного лазерного импульса

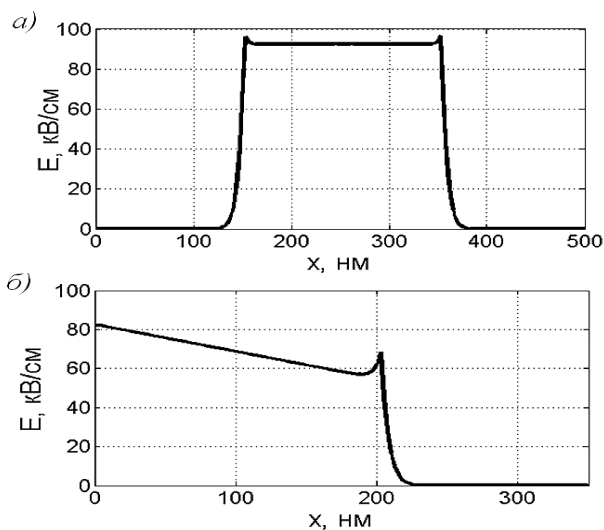


Рис. 6. Распределения абсолютной величины напряженности электрического поля в структурах GaAs p-i-n фотодиода (а) и фотодиода Шоттки p-типа (б)

На рис. 6 представлены распределения абсолютной величины напряженности электрического поля в структурах фотодетекторов в момент времени после окончания переходного процесса по питанию. Как следует из анализа графиков, рассматриваемые приборы характеризуются значительной напряженностью встроенного электрического поля в активных областях, что оказывает существенное влияние на значения подвижностей носителей заряда.

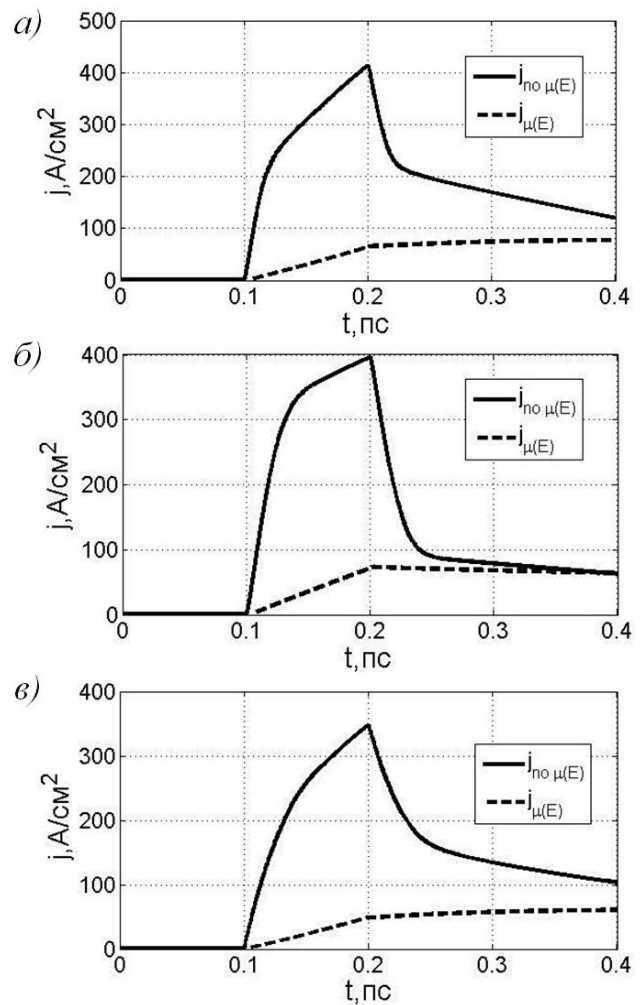


Рис. 7. Зависимости абсолютной величины фототока от времени в GaAs p-i-n структуре (а) и фотодиодах Шоттки с приконтактными областями p- (б) и n-типа (в), рассчитанные с использованием низкополевой модели (17)–(18) ( $j_{p0 \mu(E)}$ ) и модели (19)–(23) ( $j_{\mu(E)}$ ), учитывающей зависимости подвижностей носителей заряда от напряженности электрического поля

Зависимости абсолютной величины плотности фототока от времени в структурах исследованных фотодетекторов приведены на рис. 7. На графиках для сравнения отображены результаты, рассчитанные с использованием низкополевой модели подвижности (17)–(18) и моделей (19)–(23), учитывающих эффекты междолинного перехода электронов и насыщения дрейфовых скоростей носителей заряда в GaAs. Анализ представленных результатов позволяет сделать вывод о том, что рассматриваемые эффекты оказывают

существенное негативное влияние на быстродействие фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации. Сопоставление характеристик различных вариантов фотоприемников свидетельствует об отсутствии принципиальных различий между их быстродействием.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели, методы моделирования и ПО позволяют исследовать процессы переноса и накопления носителей заряда, протекающие в структурах GaAs p-i-n-фотодетекторов и фотодиодов с барьерами Шоттки, для интегральных систем оптической коммутации при детектировании субпикосекундных лазерных импульсов. Предложенная методика численного решения диффузионно-дрейфовой системы уравнений полупроводника в рамках рассматриваемой задачи характеризуется более высокой адекватностью результатов моделирования по сравнению с аналогами.

Анализ результатов моделирования позволил сделать вывод о существенном негативном влиянии указанных выше физических эффектов на быстродействие фотодетекторов интегральных систем оптической коммутации. Во внутренних электрических полях фотодиодов на основе GaAs, характеризующихся напряженностью порядка нескольких десятков кВ/см, носители заряда имеют малые подвижности. По этой причине детектирование субпикосекундных лазерных импульсов с использованием подобных приборов оказывается проблематичным.

Сравнительный анализ переходных процессов, протекающих в GaAs p-i-n структурах и фотодиодах с барьерами Шоттки, не выявил принципиальных различий между быстродействием данных приборов при детектировании субпикосекундных лазерных импульсов.

#### ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Института нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-07-00018) и Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 8.797.2014К).

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Белкин М., Сигов А.. Оптические межсоединения в интегральных схемах // Наноиндустрия. 2012. Т. 31. № 1. С. 8–14.

- [2] Коноплев Б.Г., Рындин Е.А., Денисенко М.А. Метод построения интегральных систем оптической коммутации многоядерных УБИС // Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. Т. 117. № 4. С. 21–27.
- [3] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-Drift Model of the Transport of Charge Carriers and Photons in Injection Lasers // Technical Physics Letters. 2015. V. 41. № 6. P. 587–590.
- [4] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Injection Laser with a Functionally Integrated Frequency Modulator Based on Spatially Shifted Quantum Wells // Technical Physics Letters. 2013. V. 39. № 11. P. 986–989.
- [5] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Components of Integrated Microwave Circuits Based on Complementary Coupled Quantum Regions // Russian Microelectronics. 2015. V. 44. № 3. P. 190–196.
- [6] Абрамов И.И., Харитонов В.В. Численное моделирование элементов интегральных схем / Под ред. А.Г. Шашкова. Мн.: Выш. шк., 1990. 224 с.
- [7] Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien: Springer-Verlag, 2004.
- [8] Shubert E. F. Light-Emitting Diodes. Second edition. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [9] Barry D.M., Platt S.P., Snowden C.M., Howes M.J., Miles R.E. Physical Modelling of GaAs Photodetectors // Simulation of Semiconductor Devices and Processes. Vol. 3. Baccarani G., Rudan M. (Eds.). Bologna: TecnoPrint, 1988. P. 31–42.
- [10] Unlu M.S., Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices // Journal of Applied Physics. 1995. V. 78. № 2. P. 607–639.
- [11] Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Universal Analytical Approximation of the Carrier Mobility in Semiconductors within a Wide Range of Temperatures for a Variety of Doping Densities // Semiconductors. 2004. V. 38. № 1. P. 56–60.
- [12] Гуртов В.А. Твердотельная электроника: Учеб. пособие. Петрозаводск: ПетрГУ, 2004. 312 с.
- [13] Smith P., Inoue M., Frey J. Electron Velocity in Si and GaAs at Very High Electric Fields // Applied Physics Letters. 1980. V. 37. № 9. P. 797–798.
- [14] Pozhela J., Reklaitis A. Electron transport properties in GaAs at high electric fields // Solid State Electronics. 1980. № 23. P. 927–933.
- [15] Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы: Учеб. пособие для вузов. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 432 с.
- [16] Куликова И.В., Лысенко И.Е., Приступчик Н.К., Лысенко А.С. Численное решение нестационарной фундаментальной системы уравнений полупроводника в диффузионно-дрейфовом приближении // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. Т. 158. № 9. С. 106–111.

# Physical and Layout Simulation of Photodetectors for A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> Integrated Optical Commutation Systems Accounting Electric Field Dependence of Carrier Mobility

I.V. Pisarenko, E.A. Ryndin

Southern Federal University, ivan123tgn@yandex.ru

**Keywords** — integrated optical commutation systems, high-speed integrated photodetectors, numerical physical and layout simulation, drift-diffusion equations system, the dependence of charge carrier mobilities in GaAs on electric field.

## ABSTRACT

In this paper we consider the problem of the high-speed semiconductor photodetectors research and development. These devices are designed for the operation as the parts of integrated optical commutation systems together with the lasers-modulators based on A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> nanoheterostructures. We have developed the physical and layout drift-diffusion models, the simulation methods and the software tools for research of transient processes in GaAs p-i-n structures and Schottky-barrier photodiodes for the on-chip optical commutation systems. To improve the simulation accuracy we have taken into account the dependence of the charge carrier mobilities on the electric field intensity. This dependence is determined by the effects of the intervalley electrons transition and the charge carriers drift velocity saturation in GaAs. We have obtained the results of the simulation of optical transient processes caused by the photodetectors structures illumination with subpicosecond laser pulses. According to our results the influence of above-mentioned physical effects on the integrated A<sup>III</sup>B<sup>V</sup> photodetectors performance is significant and should be taken into account during such devices simulation.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The results have been obtained using the equipment of the Shared Equipment Center and the Research and Educational Center «Nanotechnology» of the Institute of Nanotechnologies, Electronics and Electronic Equipment Engineering, Southern Federal University (Taganrog).

This research is supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant 16-07-00018) and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project 8.797.2014K).

## REFERENCES

- [1] Belkin M., Sigov A. Optical Interconnections in Integrated Circuits. *Nanoindustrija*, 2012, vol. 31, no. 1, pp. 8–14 (in Russian).
- [2] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Method of Design of Integrated Optical Commutation Systems for Multi-Core ULSIs. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2011, vol. 117, no. 4, pp. 21–27 (in Russian).
- [3] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Diffusion-Drift Model of the Transport of Charge Carriers and Photons in Injection Lasers. *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no. 6., pp. 587–590.
- [4] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Injection Laser with a Functionally Integrated Frequency Modulator Based on Spatially Shifted Quantum Wells. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 11, pp. 986–989.
- [5] Konoplev B.G., Ryndin E.A., Denisenko M.A. Components of Integrated Microwave Circuits Based on Complementary Coupled Quantum Regions. *Russian Microelectronics*, 2015, vol. 44, no. 3, pp. 190–196.
- [6] Abramov I.I., Haritonov V.V. Chislennoe modelirovanie jelementov integral'nyh shem - *Numerical Simulation of Elements of Integrated Circuits*, Minsk, Vyshejschaja shkola Publ., 1990. 224 p. (in Russian).
- [7] Palankovski V., Quay R. Analysis and Simulation of Heterostructure Devices. Wien, Springer-Verlag, 2004.
- [8] Shubert E. F. Light-Emitting Diodes. Second edition. Cambridge, Cambridge University Press, 2006.
- [9] Barry D.M., Platt S.P., Snowden C.M., Howes M.J., Miles R.E. Physical Modelling of GaAs Photodetectors. Simulation of Semiconductor Devices and Processes. Vol. 3. Bacarani G., Rudan M. (Eds.). Bologna, TecnoPrint, 1988, pp. 31–42.
- [10] Unlu M.S., Strite S. Resonant cavity enhanced photonic devices. *Journal of Applied Physics*, 1995, vol. 78, no. 2, pp. 607–639.
- [11] Mnatsakanov T.T., Levinshtein M.E., Pomortseva L.I., Yurkov S.N. Universal Analytical Approximation of the Carrier Mobility in Semiconductors within a Wide Range of Temperatures for a Variety of Doping Densities. *Semiconductors*, 2004, vol. 38, no. 1, pp. 56–60.
- [12] Guttov V.A. Tverdotel'naja jelectronika – *Solid-State Electronics*, Petrozavodsk, PetrGU Publ., 2004. 312 p. (in Russian).
- [13] Smith P., Inoue M., Frey J. Electron Velocity in Si and GaAs at Very High Electric Fields. *Applied Physics Letters*, 1980, vol. 37, no. 9, pp. 797–798.
- [14] Pozhela J., Reklaitis A. Electron Transport Properties in GaAs at High Electric Fields. *Solid State Electronics*, 1980, vol. 23, pp. 927–933.
- [15] Samarskij A.A., Gulina A.V. Chislennye metody – *Numerical methods*, Moscow, Nauka Publ., 1989. 432 p. (in Russian).
- [16] Kulikova I.V., Lysenko I.E., Pristupchik N.K., Lysenko A.S. Numerical Solution of Non-Stationary Fundamental System of Equations of Semiconductor in Diffusion-Drift Approximation. *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2014, vol. 158, no. 9, pp. 106–111. (in Russian).